

文章编号:1002-2082(2017)02-0327-04

基于聚焦物镜与 PSD 的激光对中测量方法研究

章逸舟^{1,2,3}, 鲁远甫^{1,2,3}, 陈良培^{1,2,3}, 余荣斌^{1,2,3}, 马天悦⁴, 刘先名⁴

(1. 中国科学院深圳先进技术研究院, 深圳 518055; 2. 香港中文大学, 香港 999077;

3. 深圳生物医学光电传感技术工程实验室, 深圳 518055; 4. 深圳市亚泰光电技术有限公司, 深圳 518172)

摘要:针对传统激光对中方法数学模型复杂、求解困难的不足,提出一种基于聚焦物镜与 PSD 的激光对中测量方法。该方法利用光学系统中视场与焦距的关系以及相似三角形的原理得到不对中的角度偏差和平行偏差,测量原理简单,求解方便。实验结果表明,当平行偏差和角度偏差的测量范围分别为 0.5 mm~1.5 mm, 0.047 7°~0.143 2°时,平行偏差测量误差范围为 0.035 mm~0.207 mm,角度测量误差范围为 0.000 2°~0.012 8°。最后对系统测量误差进行分析并提出一种消除安装误差影响的方法,给出了计算公式。

关键词:轴对中;激光对中;角度偏差测量;平行偏差测量;聚焦物镜;PSD

中图分类号:TN206;TH 741

文献标志码:A

doi:10.5768/JAO201738.0207004

Laser alignment measurement method based on focusing objective and PSD

Zhang Yizhou^{1,2,3}, Lu Yuanfu^{1,2,3}, Chen Liangpei^{1,2,3}, She Rongbin^{1,2,3},
Ma Tianyue⁴, Liu Xianming⁴

(1. Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China;

2. The Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077, China; 3. Biomedical Engineering Laboratory for Photoelectric Sensing Technology, Shenzhen 518055, China;

4. Shenzhen yateks optical electronic technology corporation, Shenzhen 518172, China)

Abstract: A laser alignment measurement method based on a focusing objective and PSD is proposed in order to solve the problem of mathematical model in traditional laser alignment method, which is complex and difficult to work out. Misalignment angle deviation and position deviation are acquired using relations between field of view and focal length of the optical system, and the principle of similar triangle. The measurement principle is simple and easy solving. The experiment results show that when position measurement range is 0.5 mm~1.5 mm and angle measurement range is 0.047 7°~0.143 2°, accuracy of position deviation measurement and angle deviation measurement are 0.035 mm~0.207 mm and 0.000 2°~0.012 8° respectively. Finally, error of accuracy is analyzed and a method considered for eliminating influence of installation error is proposed, and a theoretical formula is given.

Key words: shaft alignment; laser alignment; angle deviation measurement; position deviation measurement; focusing objective; PSD

收稿日期:2016-07-27; **修回日期:**2016-11-23

基金项目:深圳市科技计划项目(CXZZ20140609162846202)

作者简介:章逸舟(1988—),男,浙江建德人,硕士,主要从事光学系统设计的研究工作。

E-mail: yz. zhang1@siat. ac. cn

通讯作者:鲁远甫, (1981—),男,甘肃酒泉人,副研究员,硕士生导师,主要从事激光技术及其应用研究工作。

E-mail: yf. lu@siat. ac. cn

引言

激光轴对中技术具有高精度、高效率、直观化等优点^[1]。传统测量法测量误差在毫米量级,使用光学仪器(如瞄准仪、经纬仪)测量误差能达到 0.03 mm,而激光轴对中技术测量误差可达 0.003 mm^[2-4]。德国 Pruftechnik 公司的激光对中仪基于直角反射棱镜原理,测量精度可以达到 1 μm ,但在测量前需要输入相关机器参数^[5]。激光对中技术研究在国内起步较晚。目前国内研究多关注于激光对中的理论分析,模型算法复杂且反解求解困难,缺乏实验验证^[7-13]。本文提出一种基于聚焦物镜和 PSD(position sensitive detector)的激光轴对中测量方法,可以同时完成平行偏差和角度偏差的测量。该方法相比于其他的激光测量技术测量原理更加简单,计算求解容易,可以实现同轴度的快速检测。

1 测量原理

1.1 传统的激光对中方法

传统的激光对中系统主要基于直角反射棱镜。激光发射器和激光接收器在同一侧,直角反射棱镜反射激光并被位置探测器接收。系统在 360°范围内多个转角方位上进行测量值的自动采样,将采集的多组读数进行计算后,输出两回转轴线的对中状态,并输出消除对中偏差而应对可移动的机器的调整量。

1.2 基于聚焦物镜的激光轴对中方法

基于聚焦物镜的对中系统由激光发射器、接收器组成。接收器结构安排如下:PSD1 位于物镜的焦面,PSD2 位于焦面位置后 t 处。当激光器发出一束平行细光束,接收器的物镜对这束光进行聚焦并通过分光棱镜。部分平行细光束经分光棱镜胶合面反射汇聚在 PSD1 上,另一部分平行细光束则透射过分光面在 PSD2 上形成光斑。根据光斑在 PSD1 和 PSD2 上的坐标位置及相应几何位置关系可计算得到平行偏差和角度偏差。在不考虑安装误差的情况下,测量到的平行偏差和角度偏差就是主动轴与从动轴的不对中误差。

1.2.1 角度偏差

图 2 是对中系统在子午方向的一维等效模型。激光束由聚焦镜头头聚焦在 PSD1 上,角偏差由光学系统焦距和 PSD1 的子午坐标值决定。

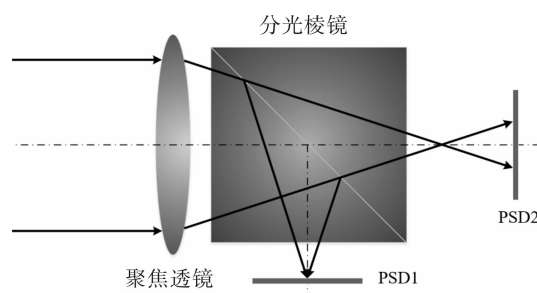


图 1 激光轴对中接收器原理图

Fig. 1 Schematic Diagram of laser alignment receiver

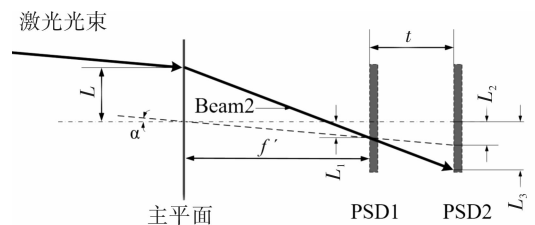


图 2 激光轴对中系统一维等效模型

Fig. 2 1D equivalent model of laser alignment system

$$\alpha = \arctan\left(\frac{L_1}{f}\right) \quad (1)$$

式中: L_1 是细光束在 PSD1 上的子午方向的坐标; f 是物镜的焦距。其中 α 正负规定为:由光线以锐角转至光轴平行,顺时针为正,逆时针为负; L_1 以及后述 L_2 、 L_3 正负规定为:以光轴为基准,光轴以上为正,光轴以下为负。

1.2.2 平行偏差

光斑在 PSD2 上子午方向坐标 L_3 和间距 t ,通过几何关系计算得到平行偏差 L :

$$L = \frac{f}{t} \cdot (L_3 - \frac{f+t}{f} \cdot L_1) \quad (2)$$

1.2.3 光学系统设计

系统的光学参数主要有焦距 f 与间距 t 。从(2)式可以得到 f 与 t 的关系式(3):

$$\frac{f}{t} = \frac{L/2}{D/2 - L_2} = \frac{L/2}{D/2 - (f+t) \cdot \tan\alpha} \quad (3)$$

从(2)式可知,系统的测量精度主要受测量值 L_1 和 L_3 的影响,对(2)式两边求导可得到误差公式:

$$\Delta L = \frac{f}{t} \cdot (\Delta L_3 - \frac{f+t}{f} \cdot \Delta L_1) \quad (4)$$

式中平行偏差测量精度 ΔL 由 PSD 测量精度 ΔL_3 与光学系统像差 ΔL_1 决定。PSD 的测量精度通常在 1 μm ,光学系统在 PSD1 上的像差误差为 0.5 μm ,在 PSD2 上的像差误差为 1 μm 。PSD 的边长 D 为 15 mm,激光轴对中系统设计的角度测量范围为

$\pm 4^\circ$, 平行偏量测量范围 L 为 ± 15 mm, 测量误差 ΔL 上限设计为 $2\ \mu\text{m}$ 。联立(3)式和(4)式计算得到焦距 f 为 80 mm, 间距 t 为 7.4 mm。

2 实验

2.1 角度偏量测量

对中系统用链式卡具分别固定在机械旋转轴的主动轴和从动轴上。通过在激光发射器端底座插入 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm 三种不同厚度的垫片, 改变轴的俯仰角从而进行角度偏量测量。理论上垫片导致 y 方向的角度改变量 $\Delta\theta$:

$$\Delta\theta = \arcsin\left(\frac{\Delta d}{l}\right) \quad (5)$$

式中: Δd 为垫片的厚度; l 为底座的边长长度 120 mm。因此插入 0.1 mm、0.2 mm、0.3 mm 垫片理论上引起的角度偏量为 0.0477° 、 0.0955° 、 0.1432° 。经过测量光学系统的实际焦距 f 为 79.54 mm, PSD 实际间距 t 为 5.86 mm。将测量值(表 1)代入公式(1)得到测量角度偏量为 0.0475° 、 0.0886° 、 0.1304° 。

表 1 角偏量测量偏差 mm

Table 1 Measurement deviator of angle deviation

垫片厚度	测试数值			平均值
	第 1 组测	第 2 组测	第 3 组测	
	试数据	试数据	试数据	
0.1	0.063	0.072	0.063	0.066
0.2	0.13	0.123	0.117	0.123
0.3	0.187	0.169	0.188	0.181

2.2 平行偏量测量

激光发射器与激光接收器分别固定在精密位移台上, 调整接收器使激光束位于 PSD1 与 PSD2 的中心位置, 通过精密平移台实现平偏。在弧矢方向即 x 方向分别移动 0.5 mm、1 mm、1.5 mm, 在每个位置重复记录 10 组数据取平均值, 如表 2 所示。测量结果表明, 上述对中方法在平行偏量和角度偏量的测试范围分别为 0.5 mm~1.5 mm 时, 平行偏量测量误差范围为 0.035 mm~0.207 mm。

表 2 平行偏量测量偏差 mm

Table 2 Measurement deviator of position deviation

平移量	0.5	1	1.5
测量偏差	0.035	0.043	0.207

中国测试技术研究院对国外激光对中仪误差进行测试, 平行偏量和角度偏量的测试范围分别为 $-0.4\ \text{mm} \sim 1\ \text{mm}$, $-310'' \sim 232''$ ($-0.086^\circ \sim 0.064^\circ$); 测试结果表明激光对中仪平行偏差测量误差范围为 $-0.03\ \text{mm} \sim 0.02\ \text{mm}$, 角度测量误差为 $-7'' \sim 11''$ ($-0.0019^\circ \sim 0.003^\circ$)^[14]。该方法与国外顶级激光对中仪相比, 角度测量能达到较高的测量精度, 平行测量精度则还有待改进。

3 消除安装误差影响的方法

在激光对中系统中, 往往安装误差的误差量远大于轴本身所需要调整的误差量, 因此必须尽量消除安装误差带来的影响。由于激光对中系统是被固定在轴上, 在轴旋转过程中安装误差是不会改变的, 只有轴对中误差随着旋转角度的改变而改变, 因此通过旋转就可得到轴误差围绕着安装误差而形成误差圆, 误差圆圆心坐标就是测量出的安装误差。任一位置坐标减去误差圆的圆心坐标就是此位置与安装误差轴中心的相对偏差。通过得到的相对误差值以及已知的焦距和间距就可以求出角偏量和平偏量:

x 方向角偏量为

$$\alpha_x = a \tan(\Delta X_1 / f) \quad (9)$$

y 方向角偏量为

$$\alpha_y = a \tan(\Delta Y_1 / f) \quad (10)$$

x 方向平偏量为

$$L_x = f \cdot (\Delta X_2 - \Delta X_1 \cdot (f+d)/f) / d \quad (11)$$

y 方向平偏量为

$$L_y = f \cdot (\Delta Y_2 - \Delta Y_1 \cdot (f+d)/f) / d \quad (12)$$

式中: ΔX_1 和 ΔY_1 是 PSD1 上实时坐标 (x_1, y_1) 与 PSD1 旋转圆圆心坐标 $(x_{\text{psd1}}, y_{\text{psd1}})$ 分别在 x 与 y 方向的差值; ΔX_2 和 ΔY_2 是 PSD2 上实时坐标 (x_2, y_2) 与旋转圆圆心 $(x_{\text{psd2}}, y_{\text{psd2}})$ 分别在 x 与 y 方向的差值。

4 结论

提出的基于聚焦物镜与 PSD 的激光对中测量方法可同时测量平行偏量和角度偏量。该方法具有原理简单、求解方便的优点。实验结果表明, 在平行偏量和角度偏量的测试范围分别为 0.5 mm~1.5 mm 和 $0.0477^\circ \sim 0.1432^\circ$ 时, 平行偏量测量误差范围为 0.035 mm~0.207 mm, 角度测量误差范

围为 $0.0002^{\circ} \sim 0.0128^{\circ}$, 达到了较高的精度。但是实验结果与理论设计值还存在偏差, 降低激光光斑的非均匀性与稳定性、PSD 的非线性度等因素对系统测量精度的影响是以后的研究方向。

参考文献:

- [1] Jiao Guohua, Li Yulin, Hu Baowen. Design of the high precision laser alignment system with PSD[J]. Transducer and Microsystem Technology, 2006, 25(6): 64-66.
焦国华, 李育林, 胡宝文. 基于 PSD 的高精度激光校准仪的设计[J]. 传感器与微系统, 2006, 25(6): 64-66.
- [2] Jarysz-Kamińska E. Sighting through as part of shaft alignment procedure[J]. Diagnostyka, 2010, 4(56): 65-68.
- [3] Jarysz-Kamińska E. Selection of measuring equipment in assembly process-analysis of selected elements[J]. Diagnostyka, 2011, 3(59): 47-52.
- [4] Hemming B. Calibration of shaft alignment instruments[J]. SPIE, 1998, 3477: 290-297.
- [5] Lysen H. Device for ascertaining alignment errors in shafts arranged in tandem; US, 4698491[P]. 1987-10-6. <https://search.glgoo.com/patents/US4698491>.
- [6] Gong Zhenglie. LD/PSD Laser shaft alignment measure with single beam[J]. Journal of Optoelectronic Laser, 2002, 13(4): 378-381.
龚正烈. 单光束 LD/PSD 激光对中测量仪及其数学模型[J]. 光电子激光, 2002, 13(4): 378-381.
- [7] Li Zhongke, Ma Ji, Xue Ju. Shaft alignment measuring technique based on LD/PSD/Prism structure[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2005, 18(4): 838-840.
李忠科, 马骥, 薛菊. LD-PSD-直角棱镜同轴度测量技术研究[J]. 传感技术学报, 2005, 18(4): 838-840.
- [8] Liu Guangjun. Design and research of the laser shaft alignment system based on virtual instrument[D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2012.
- 刘广军. 基于虚拟仪器的激光对中仪的设计与研制[D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012.
- [9] Yan Tianyan. Study on laser shaft alignment model based on single LD-PSD[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2012, 41(9): 84-86.
闫天彦. 基于单 LD-PSD 的激光对中测量数学模型研究[J]. 中国制造业信息化, 2012, 41(9): 84-86.
- [10] Wang Zhiqun. The study and design of laser alignment instrument[D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2005.
王智群. 激光对中仪研发[D]. 北京: 北京工业大学, 2005.
- [11] Leng Mei. Establishing mathematical model of laser shaft alignment instrument and non-linear calibration analysis[D]. Shenyang: Shenyang University of Technology, 2009.
冷梅. 激光对中仪数学模型的建立及其标定研究[D]. 沈阳: 沈阳工业大学, 2009.
- [12] Li Zhongke. Shaft alignment measuring technique based on LD/PSD/prism structure[J]. Computer Measurement & Control, 2005, 12(11): 1195-1196.
李忠科. 双 LD-双 PSD 同轴度测量技术研究[J]. 计算机测量与控制, 2005, 12(11): 1195-1196.
- [13] Zheng Ergong. Research on coaxiality calibration technology[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2006.
郑二功. 基于 LD/PSD 的激光同轴度校正技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [14] Bai Xianglong, Gu Aiming, Ding Fuquan. The error test method of laser alignment instrument[J]. Measurement Technique, 1998(6): 2-4.
白翔龙, 顾爱明, 丁福全. 激光对中仪误差的测试方法[J]. 计量技术, 1998(6): 2-4.